



**EXPERIMENTELLA OCH TEORETISKA STUDIER AV DEN PRIMÄRA
KOSMISKA STRÅLNINGENS LADDNINGSSPEKTRUM**

Rolf Andersson

Lund 1974

EXPERIMENTELLA OCH TEORETISKA STUDIER AV DEN PRIMÄRA
KOSMISKA STRÄLNINGENS LADDNINGSSPEKTRUM

av

Rolf Andersson

FM, B1

Akademisk avhandling som för avläggande av filosofie doktorsexamen vid matematisk-naturvetenskapliga fakulteten vid universitetet i Lund kommer att offentligt försvaras å Fysiska institutionens föreläsningssal B fredagen den 15 november 1974 kl 10.15.

EXPERIMENTAL STUDIES IN THE FIELD OF
COGNITIVE PSYCHOLOGY



ANALYSIS OF THE DATA OF THE EXPERIMENTAL STUDIES IN THE FIELD OF
COGNITIVE PSYCHOLOGY. THE RESULTS OF THE EXPERIMENTAL STUDIES IN THE
FIELD OF COGNITIVE PSYCHOLOGY. THE RESULTS OF THE EXPERIMENTAL STUDIES
IN THE FIELD OF COGNITIVE PSYCHOLOGY. THE RESULTS OF THE EXPERIMENTAL
STUDIES IN THE FIELD OF COGNITIVE PSYCHOLOGY. THE RESULTS OF THE
EXPERIMENTAL STUDIES IN THE FIELD OF COGNITIVE PSYCHOLOGY. THE RESULTS
OF THE EXPERIMENTAL STUDIES IN THE FIELD OF COGNITIVE PSYCHOLOGY.

Den kosmiska strålningen innehåller väsentlig information om universums byggnad. Kunskaper om strålningens källa, om selektionsmekanismer och acceleration samt om hur partikeltransporten sker i interstellär och intergalaktisk rymd kan bidra till vårt vetande om universums sammansättning och kemiska utveckling och om de krafter, som verkar i olika astronomiska objekt. Den kosmiska strålningen är emellertid till sin natur ytterst gåtfull, och trots betydande ansträngningar har man inte kunnat fastställa dess ursprung. Man känner inte heller med säkerhet den mekanism, som svarar för partiklarnas acceleration, och man vet föga om partiklarnas verkliga rörelser i rymden. Dock kan man genom noggranna studier av strålningens kemiska sammansättning och av partiklarnas energispektrum få viktig information om hur strålningen genererats och om dess utbredning i rymden och därmed också vissa upplysningar om universums byggnad.

Mycket extrema energikrav måste uppfyllas av strålningens källa. Dess effekt måste vara tillräcklig för att hålla strålningens energitäthet på en konstant nivå, och det måste existera mekanismer, som kan accelerera partiklar upp till energier av storleksordningen 10^{20} eV. Vidare måste källan kunna producera strålning med en sådan sammansättning, att denna efter eventuella ändringar under strålningens transport genom rymden överensstämmer med den av oss observerade. Bland källor, som föreslagits, kan nämnas exploderande supernovor och pulsarer. Dessa uppfyller åtminstone några av fordringarna och kan i stort förklara den observerade strålningen. Noggranna studier av den kosmiska strålningens elementsammansättning visar emellertid, att det är svårt att förstå strålningens alla egenskaper med dessa objekt som källor. De tycks t.ex. inte i detalj kunna förklara det relativa överskottet av de tyngre elementen i primärstrålningen. Detta överskott tycks i stället kunna förklaras med hjälp av en selektionsmekanism, som verkar på materia med naturlig sammansättning.

Denna diskussion har redan visat, att detaljerade kunskaper om strålningens sammansättning är nödvändiga, om man skall kunna dra några slutsatser om källan och om de mekanismer, som verkar där. Dessa kunskaper är också betydelsefulla vid bestämning av

avståndet till den tänkta källan. Frekvensen av vissa atomkärnor i strålningen, vilka företrädesvis bildas genom spallationreaktioner under själva transporten, är nämligen ett mått på hur mycket materia, som passerats mellan källa och detekteringsplats. Således har man bestämt mängden passerad materia genom att studera dels förekomsten av de lätta kärnorna Li, Be och B och dels förekomsten av spallationsprodukter i Fe-gruppen. Dessa data om sekundärkärnors förekomst har givit upphov till en transportmodell för den kosmiska strålningen, där strålningens läckage ut ur galaxen är en viktig parameter (1). En kontroll av denna transportmodell kan ske med hjälp av data från ett tredje laddningsintervall. Denna avhandling diskuterar förutom ett antal problem i anslutning till experimentella mätningar av primärstrålningens laddningsspektrum möjligheterna att få information om strålningens transport ur ett sådant ovan nämnt tredje elementintervall.

Då det gäller att skaffa de viktiga kunskaperna om laddningsspektret är man hänvisad till experimentella observationer från höghöjdsballonger eller satelliter. En vanlig typ av detektor är därvid kärnemulsioner, som också använts i den experimentella delen av denna avhandling. Kärnemulsionerna är under exponeringen packade intill varandra i ett paket, en s.k. stack. När en partikel passerar genom emulsionsstacken, kommer partikeln att förlora energi. Den till emulsionen överförd energi påverkar därvid kristaller i emulsionen så, att dessa blir framkallningsbara, och ett spår uppträder efter framkallning. Det framkallade spårets korntäthet beror på partikelns energiförlust, som i sin tur beror på partikelns laddning och hastighet. Genom att på ett eller annat sätt mäta korntätheten i ett sådant spår får man en storhet, som är en funktion av den passerande partikelns laddning och hastighet. Det är således möjligt - åtminstone i princip - att bestämma en partikels identitet ur mätning av korntätheten i spåret, om partikelns hastighet är känd eller kan bestämmas på något oberoende sätt. Lättast att identifiera är s.k. relativistiska partiklar vars hastighet ligger nära ljushastigheten. Vid passage genom emulsionsstacken ändras inte dessa partiklars hastighet nämnvärt, vilket innebär att spårets utseende inte heller förändras. Partikelns laddning kan då bestämmas genom mätning av enbart en korntäthetsparameter. Vid lägre hastigheter sker en icke försumbar uppbromsning av par-

tikeln i emulsionsstacken, och spårets korntäthet är ej längre konstant. I detta fall krävs för identifiering mätning av ytterligare en parameter. Om partikeln har så låg hastighet, att den stannar i emulsionsstacken, kan dess återstående räckvidd användas som andra parameter. För det fall partikeln inte stannar i emulsionsstacken, finns det en möjlighet att som andra parameter använda ändringen i korntäthet längs spåret. I samband med en studie av den relativa förekomsten av kärnor tyngre än svavel har i avhandlingen möjligheterna diskuterats att identifiera partiklar, som inte stoppar i detektorn, men vars hastighet är så låg, att de ej kan identifieras genom mätning av enbart en parameter.

Eftersom jordens magnetfält verkar som en impulsdiskriminator kommer på varje geografisk ort och för varje riktning att finnas en viss kinetisk tröskelenergi, under vilken inga partiklar når ner till atmosfären. Man kan därför helt enkelt välja platsen för sitt experiment så, att det geomagnetiska tröskelvärdet är tillräckligt högt för att endast tillåta relativistiska partiklar att nå detektorn. För laddningsidentifiering behövs då, enligt vad som ovan sagts, endast mätning av en korntäthetsparameter. Då det stöter på stora svårigheter att i detalj bestämma magnetfältet, har man i regel endast utnyttjat den effektiva vertikala tröskelenergin, när man valt platsen för experimentet. Detta förenklade sätt att utnyttja magnetfältet för diskriminering av lågenergetiska partiklar kan vara vanskligt, då den geomagnetiska tröskelenergin förutom variation med riktningen också visar upp en oskarp gräns för selektion av partiklar, en s.k. halvskugga. Halvskuggan är ett mer eller mindre utsträckt energiområde, där partiklarna bara diskrimineras vid vissa energier. Utseendet på detta energiområde varierar såväl med riktning som från plats till plats. Överskattas tröskelvärdet i ett experiment, kommer partiklar med lägre hastighet än väntat att registreras och systematiska fel att introduceras i laddningsidentifieringen. I avhandlingen diskuteras möjligheterna för felidentifiering av partiklar, när data för det magnetiska tröskelvärdet är felaktigt eller otillräckligt.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

Föreliggande avhandling omfattar följande fyra arbeten:

- I Photometric measurements on tracks of very heavy cosmic ray particles with $E \geq 1$ GeV/nucleon.
Publicerat som abstract i International Nuclear Information System (INIS) och Nuclear Science Abstract (NSA).
(Tillsammans med L. Larsson och O. Mathiesen).
- II The velocity dependence of photometrically determined track width of heavy ions in Ilford G5 nuclear emulsions.
Publicerat i Nuclear Instruments and Methods 114, 35 (1973).
(Tillsammans med L. Larsson och O. Mathiesen).
- III The energy distribution of very heavy cosmic ray nuclei within the penumbra at Palestine, Texas.
(Tillsammans med O. Mathiesen och L. Larsson).
- IV The abundance of nuclei from sodium to silicon in cosmic rays.

Rapporter har lämnats vid

- 1) Svenska nationalkommitténs för fysik konferens i Lund, juni 1972.
- 2) 13th International Conference on Cosmic Rays, Denver, Colorado, U.S.A., augusti 1973.

Arbete I, II och III baseras på mätningar gjorda i emulsioner. Den primära målsättningen var att bestämma laddningsspektrets utseende i intervallet $16 \leq Z \leq 28$. De spår av tunga joner, som studerats, har erhållits vid två olika ballongexponeringar. Den ena har gjorts över Texas, U.S.A., där jordmagnetiska fältet ansetts endast släppa igenom relativistiska eller nästan relativistiska partiklar, samt den andra över Fort Churchill i Norra Kanada, där också partiklar med låga hastigheter kan nå detektorn.

I arbete I har laddningsspektret studerats för den strålning, som detekterats över Texas. Som primär storhet vid laddningsidentifiering har använts den fotometriskt bestämda spårbredden W . En utförlig beskrivning av den använda mätapparaturen och mätmetoden finns i arbete I. I spektret har registrerats en avsevärd

inblandning av icke relativistiska partiklar trots att vertikala tröskelenergin ej har ansetts tillåta detta. För att identifiera en relativistisk partikel behöver man endast mäta spårbredden W , medan identifiering av en icke relativistisk partikel kräver ytterligare en mätt parameter. I detta arbete har som andra parameter använts W 's förändring längs spåret, $\frac{\partial W}{\partial R}$ (denna parameter diskuteras i arbete II). Den experimentella uppskattningen av $\frac{\partial W}{\partial R}$ är emellertid känslig för störningar i emulsionerna och kräver långa partikelspår. Detta gör laddningsidentifieringen av icke relativistiska partiklar något osäker, och fullständig separation mellan olika slags laddningar har ej uppnåtts. Undersökningen visar emellertid, att kan bara partikelspårerna mätas tillräckligt långt eller är störningarna i emulsionerna små ger parametern $\frac{\partial W}{\partial R}$ tillsammans med spårbredden W den önskade informationen för korrekt laddningsidentifiering. Intensiteten vid toppen av atmosfären för de båda laddningsgrupperna $16 \leq Z \leq 19$ och $20 \leq Z \leq 28$ har beräknats till $0,092 \pm 0,012$ respektive $0,38 \pm 0,04 \text{ (m}^2 \text{ sr s)}^{-1}$. Dessa värden visar god överensstämmelse med de resultat, som är presenterade av Freier och Waddington (2) och som erhållits vid samma ballongflygning.

Avsikten med arbete II var att bestämma att samband mellan W , hastigheten β och laddningen Z för en detekterad partikel. För att finna en sådan relation studerades stoppande spår av lågenergetiska partiklar från exponeringen gjord över Fort Churchill. I ett begränsat hastighetsintervall $0,4 \leq \beta \leq 0,8$ kunde det sökta sambandet skrivas

$$W(\beta, Z) = W_0(Z) \beta^{-\alpha(Z)}$$

där W_0 och α är parametrar, som endast beror på laddningen Z . Denna relation har sedan använts för att beräkna ändringen av W längs spåret, $\frac{\partial W}{\partial R}$, som har kommit till användning i arbete I vid identifiering av icke relativistiska partiklar.

De i arbete I registrerade lågenergetiska partiklarna har i arbete III utsatts för en noggrannare analys. Avsikten har varit att kvantitativt jämföra den experimentellt erhållna fördelningen av lågenergetiska partiklar med en teoretisk baserad på de cutoff data för experimentorten, vilka redovisats av Shea och Smart (3). Jämförelsen visar, att de registrerade lågenergetiska partiklarna med rigiditeter vid atmosfärens topp ner till $\approx 3 \text{ GV}$ kan förklaras

med dessa cutoff data. Den teoretiska energifördelningen för partiklarna har också använts för att beräkna en förväntad fördelning av spårbredden W på mätdjupet i emulsionsstacken. Jämförelse har gjorts mellan den experimentellt erhållna fördelningen av spårbredden W för Fe-gruppen och den teoretiskt förväntade. Fördelningarna visar god överensstämmelse.

I arbete IV har det förväntade spektret vid atmosfärens topp beräknats för laddningsintervallet $11 \leq Z \leq 14$. Beräkningarna är baserade på en elementsammansättning i källan lik solsystemets och med en selektion av de accelererade partiklarna, vilken beror på tvärsnittet för jonisation av neutrala atomer. Vid beräkning av strålningens utbredning i interstellär rymd har som transportmodell använts, dels en s.k. "slab"-modell, där alla partiklar antas ha gått samma väglängd, dels en modell med exponentialfördelade väglängder för partiklarna. Vid jämförelse mellan gjorda beräkningar och experimentella mätdata fås som passerad materiemängd i slab-modellen $\approx 4 \text{ g cm}^{-2}$ medan den exponentiella modellen ger en läckagelängd för partiklarna $\geq 5 \text{ g cm}^{-2}$. Isotopen ^{26}Al har en halveringstid $\approx 7,4 \cdot 10^5$ år, vilken kan vara jämförbar med den kosmiska strålningens ålder. Möjligheten att använda denna isotop som klocka för strålningen diskuteras. Kvoten Na/Al visade sig i detta avseende så fördelaktig, att den borde kunna ge information om strålningsåldern. Tyvärr är de nödvändiga experimentella bestämningarna fortfarande alltför osäkra för bestående slutsatser.

Till professor Krister Kristiansson vill jag framföra mitt varma tack för hans alltid instruktiva hjälp, som givit mig ovärderlig stimulans vid arbetets genomförande. Jag vill också tacka professor Sten von Friesen för all uppmuntran och för det vänliga intresse med vilket han följt arbetet. Till min handledare och medförfattare docent Olev Mathiesen står jag i största tacksamhetsskuld. Hans energi, noggrannhet och rika kunskaper har varit oskattbara tillgångar vid detta arbetes tillkomst. Min medförfattare fil.dr. Leif Larsson tackar jag hjärtligt för flera års stimulerande samarbete. Jag vill också till fröken Birgit Lindkvist rikta ett varmt tack för värdefull hjälp med såväl framkallnings- som mikroskoparbete. Ett stort tack också till alla kolleger, som på olika sätt hjälpt mig i mitt arbete och som gjort samvaron på av-

delningen för kosmisk högenergifysik stimulerande och nöjsam.
För skickligt ritade figurer tackar jag fröken Elna-Greta Broomé
och för all hjälp med utskrifter och stencileringsarbete skall
sekreterare Malte Henrysson ha stort tack.

För välvilligt ekonomiskt bistånd tackas slutligen Statens
Naturvetenskapliga Forskningsråd.

Avdelningen för kosmisk högenergifysik,
Fysiska institutionen, Lunds Universitet,
Oktober 1974.

Summary

The present thesis treats of the composition of primary cosmic radiation. It discusses results from measurements on heavy cosmic ray particles in the nuclear interval $16 \leq Z \leq 28$, made in nuclear emulsions that have been exposed to primary radiation in high altitude balloon flights. In a second part of the thesis a charge spectrum at the top of the atmosphere is calculated. The calculations cover the interval $11 \leq Z \leq 14$, and are based on certain assumptions regarding the source and transport mechanism.

The emulsion stack, used for the experimental study of the charge spectrum, was exposed in a balloon flight over Texas, U.S.A. The geomagnetic threshold rigidity for this site of exposure was assumed to be sufficiently high to allow only relativistic particles to reach the emulsion detector. To determine the charge of a relativistic particle only one ionization parameter is needed. The parameter measured in this experiment is the track width. This quantity has been measured with a nuclear track photometer.

It was found that a non-negligible fraction of non-relativistic particles existed in the registered flux of very heavy nuclei. To identify such particles it is necessary to measure two quantities, which both depend on charge Z and velocity β but in a different manner. In this experiment the identification of these particles was achieved by using the track width, W , and its rate of change along the track $\frac{\partial W}{\partial R}$.

To determine the parameter $\frac{\partial W}{\partial R}$ for all observed nuclei, relations between the track width and the velocity were established in a separate investigation. It was found that these relations might be written

$$W(\beta, Z) = W_0(Z) \beta^{-\alpha(Z)},$$

where W_0 and α are quantities which only depend on charge Z . From these relations the rate of change of track width could be calculated.

The intensities of the charge groups $16 \leq Z \leq 19$ and $20 \leq Z \leq 28$ at the top of the atmosphere were calculated and found to be 0.092 ± 0.020 and $0.38 \pm 0.04 \text{ (m}^2 \text{ sr s)}^{-1}$, respectively.

The non-relativistic particles found in the Texas exposure were further studied. The low energy end of the rigidity spectrum was compared with a corresponding theoretical spectrum based on geomagnetic data computed by Shea and Smart (3). The two distributions were found to be in qualitative agreement with each other.

The theoretical calculations of the charge spectrum in the interval $11 \leq Z \leq 14$ were made in order to investigate the possibility of determining the amount of matter passed by the radiation from the composition of this element interval. The calculations were based on the assumption that the cosmic ray particles were selected by an ionization process from neutral matter whose composition is nearly the same as that of the solar system. Abundance ratios between odd and even elements were calculated and used to estimate the amount of matter passed for different transport models. Comparisons with experimental data show a path length of about 4 g cm^{-2} for the slab model, and an escape length larger or equal to 5 g cm^{-2} for the exponential path length distribution model.

The possibility of using the radioactive isotope ^{26}Al as a clock for cosmic rays has been studied. It was found that the ratio between the abundance of sodium and aluminium is especially suitable for such an age determination. However, available experimental abundance data are not yet sufficiently accurate to make such a determination.

Referenser:

1. Shapiro, M.M., R. Silberberg and C.H. Tsao,
Acta Phys. Hung. 29, Suppl. 1, 463-477 (1970).
2. Freier, P.S. and C.J. Waddington,
Phys. Rev. 175, 1641 (1968).
3. Shea, M.A. and D.F. Smart,
Proc. 12th Int. Conf. Cosmic Rays, p.848 (1971).

